

## 羽毛球动态稳定性研究

张晶华\*, 汪仁煌, 岳洪伟

(广东工业大学 自动化学院, 广州 510090)

(\*通信作者电子邮箱 ls198168@163.com)

**摘要:**为了解决羽毛球动态稳定平衡调节问题,提出了羽毛片质点影响系数调节法。该方法结合羽毛球质量模型以及羽毛片质量、弯拱度和攻角等相关要素,通过调节质心高度得到对应的质点影响系数,求取倾斜摆动平方最小值得到满足羽毛球动态稳定性要求的羽毛片的质心调节高度。与传统的羽毛球动态稳定调节须依赖经验积累相比,所提出的羽毛片质点影响系数法形成了一个理论系统,并且具有耗时少、效率高等特点。通过数值实验进一步地验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:**羽毛球动态稳定性;羽毛片;质点影响系数法;离心力;弯拱度;攻角

**中图分类号:** TP706      **文献标志码:** A

### Research on dynamic stability of badminton

ZHANG Jinghua\*, WANG Renhuang, YUE Hongwei

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510090, China)

**Abstract:** To solve the problem of the regulation of badminton dynamic stable equilibrium, the particle influence coefficient method of feather piece was put forward. The method combined badminton quality models and quality feather piece, bending camber degree, angle of attack, and other related factors. The feather piece of particle influence coefficient was obtained by adjusting the height centroid which satisfied badminton dynamic stability requirements got by striking tilt minimum square. Compared with the traditional badminton dynamic stabilization which must depend on the experience accumulated for a long time, the badminton particle influence coefficient method of feather piece that was put forward by this paper formed a theoretical system. And it had less time consumption, high efficiency, etc. The numerical results show that the proposed method is correct and effective.

**Key words:** dynamic stability of badminton; feather piece; particle influence coefficient method; centrifugal force; bending camber degree; angle of attack

## 0 引言

随着社会的发展,人们生活节奏加快,越来越多的人开始关注自身健康。由于羽毛球运动不受场地限制和技术要求,使其深受人们喜爱,进而对羽毛球产量需求以及其质量要求也在不断提高,甚至国内外出现一大批学者对其有关知识进行深入研究<sup>[1-14]</sup>,比如关于天然羽毛片制成的羽毛球与塑料羽毛片制成的羽毛球之间的差异。文献[1]利用实验测量并对比天然羽毛片制成的羽毛球与塑料羽毛片制成的羽毛球之间在不同速度下对应空气阻力系数的大小关系;文献[2]通过实验对比在不同速度和不同条件下,天然羽毛球的雷诺系数与其空气阻力系数之间的关系;关于羽毛球飞行轨迹的研究有文献[3]在二维坐标下以质点的形式对比天然羽毛片制成的羽毛球与塑料羽毛片制成的羽毛球在不同速度下的飞行轨迹;林传潮<sup>[4]</sup>简单介绍天然羽毛球飞行过程受到的空气阻力分类以及其产生原因,并用动量定理给出其质点形式的一般飞行轨迹;关于羽毛球质量等级分类的研究有文献[5]借

助摄像头并结合图像处理技术提出判断天然羽毛球的球冠是否为圆形的方法,以此作为羽毛球质量等级分类的依据;文献[6]提出用粒子图像测速(Particle image velocimetry)技术来检测悬浮中的天然羽毛球是否摇摆的方法,以此作为羽毛球质量等级分类的判断依据。然而关于羽毛球质量等级分类最重要的指标——羽毛球飞行动态稳定性,目前关于其研究查到的只有文献[14],主要采用光电技术检测悬浮在风洞中的羽毛球动态信号,以此作为具有动态稳定的羽毛球质量分类标准。但文献[14]只是简单对制造好的羽毛球质量等级进行分类,并没有给出羽毛球动态稳定性的确切定义,也没有对造成羽毛球动态不稳定的原因进行深入研究,更没有给出羽毛球动态不稳定的平衡调节处理方法。为此,本文在其基础上进行深入研究。首先给出羽毛球动态稳定的定义;其次对造成其动态不稳定原因进行分析归纳;最后给出其动态不稳定的平衡调节方法及步骤,并用实验进行验证。

## 1 羽毛球动态稳定定义

羽毛球被瞬间击打飞行后,因受空气等作用其飞行状态

收稿日期: 2013-09-23;修回日期: 2013-11-22。

**作者简介:**张晶华(1981-),男,广西玉林人,博士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别;汪仁煌(1945-),男,上海人,教授,博士生导师,主要研究方向:智能测控、信息处理、智能仪器、机器视觉;岳洪伟(1979-),男,安徽亳州人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图像处理、模式识别。

是时变速的,如果羽毛球质量均匀分布,制造和安装都合格,羽毛球在飞行旋转过程当中其质量轴线(或惯量轴线)与其实际旋转轴线重合,则称羽毛球是动态稳定的;反之,则称羽毛球是动态不稳定的。

具有动态稳定的羽毛球,其飞行轨迹类似抛物线曲线,且其落点在 $x$ 轴上,如图1(a)所示;不具有动态稳定的羽毛球,则其落点会偏离 $x$ 轴的左边或者右边,不利于落点控制。由于羽毛球组成要素本身的特点,比如说羽毛片的质量不均匀、弯拱度不同、安装角不一样以及羽毛片的攻角不一致,制造和安装时产生的误差等,这些原因都会引起羽毛球质量分布不均匀,造成羽毛球新的不稳定,进而导致空气作用在羽毛片上的力大小不一样,这些力对羽毛球动态稳定影响很大,若空气作用在羽毛球上所产生的力不能够相互抵消,不仅影响羽毛球固有特性“旋转”,引起羽毛球旋转过程中产生摇摆或晃动,还会造成羽毛球飞行偏离预想轨迹和落点。总的来说,引起羽毛球动态不稳定的主要有两种原因:一是羽毛球质量不平衡,二是羽毛球气动力不对称。本文重点研究羽毛球质量不平衡,关于羽毛球气动力不对称则另文研究。

## 2 羽毛球动态不稳定原因与分析

目前国内外关于羽毛球动态不稳定的具体研究文献很少,也很少见到有关羽毛球动态不稳定的平衡处理方法报道。关于羽毛球动态不稳定的处理,当前某工厂采用的都是自己内部实践归纳总结的一些经验,并没有形成统一的理论指导系统,也没有对其原因进行深入探讨。本文借助某工厂经验进行深入研究,分析造成羽毛球动态不稳定的原因,并给出其平衡调节处理方法。

首先假设羽毛球作为一个整体是刚体的,即羽毛球在飞行旋转过程当中受到任何作用下都不会产生变形。事实上,羽毛球在飞行旋转过程当中,羽毛片受到空气等作用产生的力会引起自身的变形,只是不同时刻变形程度不一样而已。在此,假设羽毛片在羽毛球飞行旋转过程中变形不大,其变形对羽毛球动态稳定的影响可忽略不计。

羽毛球飞行旋转时会绕着其自身旋转轴旋转,现已假设羽毛球为刚体,并以时变角速度 $\omega$ 做旋转运动。取羽毛球对称旋转轴为 $z$ 轴,以羽毛球飞行方向为正,做垂直 $z$ 轴为 $x$ 轴, $y$ 轴按右手定则给出。设羽毛球质心为 $C(x_c, y_c, z_c)$ ,其质量为 $m_c$ ,其到羽毛球旋转轴的距离为 $r_c$ ,则羽毛球质心 $C$ 对其旋转轴产生的离心力为:

$$F_c = m_c \omega^2 r_c \quad (1)$$

任取羽毛球上一质点为 $C_i(x_i, y_i, z_i)$ (注:羽毛球质心是由16片羽毛片质心和一个球托质心组成),质量为 $m_i$ ,即有 $m_c = \sum_{i=1}^{17} m_i$ ,其到羽毛球旋转轴的距离为 $r_i$ 。由于羽毛球飞行旋转过程当中,球托或16片羽毛片的旋转角速度与整个羽毛球旋转角速度是一样的,因而球托质心或16片羽毛片质心旋转角速度也和羽毛球质心旋转角速度相同,则任意质点 $C_i(x_i, y_i, z_i)$ 对羽毛球旋转轴产生的离心力为 $F_i = m_i \omega^2 r_i$ 。结合式(1)有如下关系式:

$$F_c = m_c \omega^2 r_c = \sum_{i=1}^{17} F_i = \sum_{i=1}^{17} m_i \omega^2 r_i = \sum_{i=1}^{16} m_i \omega^2 r_i + m_{17} \omega^2 r_{17} = \omega^2 \left( \sum_{i=1}^{16} m_i r_i + m_{17} r_{17} \right) \quad (2)$$

其中: $m_{17} \omega^2 r_{17}$ 为球托质心对羽毛球旋转轴产生的离心力, $\sum_{i=1}^{16} m_i \omega^2 r_i$ 为16片羽毛片质心对羽毛球旋转轴产生离心力的和。

式(2)表明,羽毛球质心对其旋转轴产生的离心力可以分解为球托质心与16片羽毛片质心对其旋转轴产生离心力的和。因此关于羽毛球动态稳定的研究可以转化为对其球托质心和16片羽毛片质心等羽毛球组成要素的研究。

为了探求羽毛片和球托对羽毛球动态稳定的影响,取质量都为0.11 g、类型相同以及长度一样的16片羽毛片和质量为2.06 g的球托,将其组装成一个羽毛球,16片羽毛片在球托中的高度也一样,攻角为 $70^\circ$ ,利用某工厂提供的羽毛球风洞实验装置,将其放到风洞中实验,如图1(b)所示,则其在风洞中旋转稳定且无偏摆现象。此时测得羽毛球在风洞中的旋转速度为480转/min,用实验法并结合相关处理技术得到球托质心点到其旋转轴的距离为10 mm,每片羽毛片质心点到其旋转轴的距离为11.7 mm,则球托质心对其旋转轴产生的离心力为 $F_{17} = m_{17} \omega^2 r_{17} = 0.132$  N,16片羽毛片质心对其旋转轴产生的离心力的和为 $F_{16} = \sum_{i=1}^{16} m_i \omega^2 r_i = 0.132$  N,由于羽毛球在风洞实验中旋转稳定,从而有 $F_{16} + F_{17} = 0$ ,即羽毛球质心对其旋转轴产生的离心力合力为零。按照类似上面的做法,通过改变羽毛片的高度和位置或者用不同类型和不同质量羽毛片组装成的羽毛球继续做实验,计算它们对其旋转轴产生的离心力,并观察其在风洞中旋转偏摆情况,对所得计算结果和在风洞产生现象进行分析归纳。

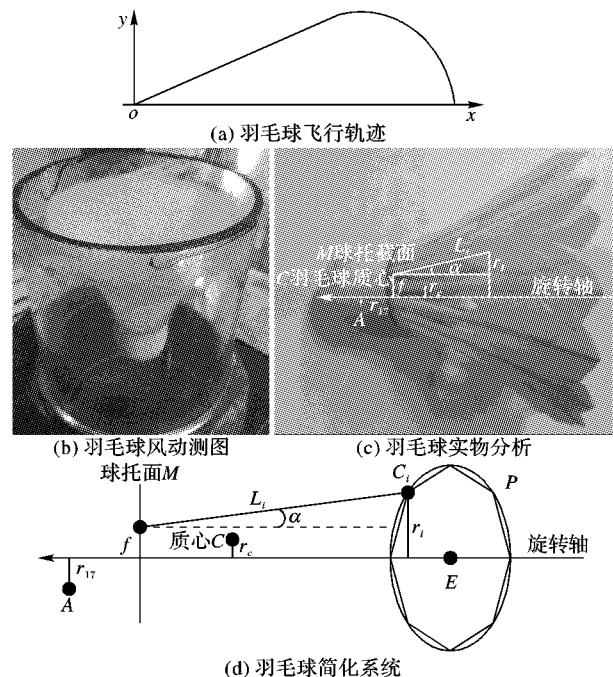


图1 羽毛球飞行轨迹、风洞、实物分析与简化

任取一个插好的羽毛球如图1(c)所示,为了便于叙述研

究,对其原图进行简化,球托面用  $M$  表示,任意一片羽毛片的质心点用  $C_i$  表示,16 片羽毛片质心点依次连接形成的图形用  $P$  表示,球托质心点用  $A$  表示,羽毛片的攻角为  $\alpha$ 。所谓攻角,即羽毛片与羽毛球旋转轴  $z$  轴所形成的夹角。

在羽毛球中球托质心点位置一般比较固定,因而随着 16 片羽毛片质量大小或者位置等发生改变,羽毛球质心位置也随之改变,但不管其如何变化,根据实验测量结果和其在风洞中的旋转现象,结合式(2)得,若 16 片羽毛片质心对羽毛球旋转轴产生离心力的合力与球托质心对其旋转轴产生的离心力大小相等,方向相反,则羽毛球是动态稳定的。实验结果表明,影响羽毛球动态稳定的主要是羽毛片,其对羽毛球动态稳定的影响可简化为 16 片羽毛片质心依次连接形成的图形  $P$  进行讨论。若图形  $P$  为一个正 16 边形,即 16 片羽毛片的质心均匀分布在同一个圆周上,其圆心用  $E$  表示,则有如下两种情况。

1) 球托质心和圆心  $E$  都落在羽毛球旋转轴上。

假如球托质心和圆心  $E$  都落在羽毛球旋转轴上。由于 16 片羽毛片质心均匀分布在同一个圆周上且圆心  $E$  在旋转轴上,所以 16 片羽毛片质心点到其旋转轴的距离相等。则任意一片羽毛片质心对其旋转轴产生的离心力为  $m_i r_i \omega^2$ ,由于球托质心在旋转轴上,因而其对旋转轴产生的离心力为零。

① 若有

$$\sum_{i=1}^{16} \omega^2 m_i r_i = 0 \quad (3)$$

即 16 片羽毛片对其旋转轴产生的离心力合力为零,此时羽毛球为动态稳定的。

假设羽毛片插入点到旋转轴的距离为  $f$ ,如图 1(c) 所示,则任一羽毛片到旋转轴  $z$  轴上的距离有关系式  $r_i = f + l_i \sin \alpha$ ,其中  $l_i$  为第  $i$  片羽毛片质心点到球托面  $M$  插入点的距离。将其代入式(3)得:

$$\omega^2 \sum_{i=1}^{16} m_i (f + l_i \sin \alpha) = 0 \quad (4)$$

另外,根据实验归纳总结,羽毛片质心点到球托面插入点的距离  $l_i$  不仅与羽毛片长度有关,还与其弯拱度有关,其关系式为:

$$l_i = L_i/2 - 0.005 \times (n_i + h_i) \quad (5)$$

其中:  $L_i$  为第  $i$  片羽毛片的长度,  $n_i$  为第  $i$  片羽毛片的弯度,  $h_i$  为第  $i$  片羽毛片的拱度。

把式(5)代入式(4),有:

$$\omega^2 \sum_{i=1}^{16} m_i \{f + [L_i/2 - 0.005(n_i + h_i)] \sin \alpha\} = 0 \quad (6)$$

由式(6)可知,羽毛球飞行旋转角速度、球托质量大小、羽毛片攻角、羽毛片长度、羽毛片质量大小以及羽毛片的弯拱度等都会对羽毛球动态稳定产生影响。

② 若  $\omega^2 \sum_{i=1}^{16} m_i r_i \neq 0$  时,即 16 片羽毛片对其旋转轴产生的离心力的合力不为零,则羽毛球飞行旋转时会引起球冠摆动而球头不摆动的现象。

2) 球托质心和圆心  $E$  都不落在羽毛球旋转轴上。

① 球托质心和圆心  $E$  在旋转轴的同一侧时,它们离心力的合力都不可能为零,此时羽毛球是动态不稳定的。

② 假如球托质心和圆心  $E$  在羽毛球的旋转轴的异侧,当  $\sum_{i=1}^{16} m_i \omega^2 r_i + m_{17} \omega^2 r_{17} = 0$ ,即球托质心点与 16 片羽毛片质心点对其旋转轴产生的离心力合力为零,则羽毛球是动态稳定的;当  $\sum_{i=1}^{16} m_i \omega^2 r_i + m_{17} \omega^2 r_{17} \neq 0$  时,不管谁大谁小,羽毛球飞行旋转时都伴随有摆动或晃动现象,此时羽毛球为动态不稳定的。

此外,当 16 片羽毛片质心点依次连接线形成的图形  $P$  不是一个正十六边形时,仍可类似上面 1) 和 2) 进行讨论分析,在此不累赘叙述。

综上所述,因不同羽毛片组装成的羽毛球,其动态稳定也不一样。因此有必要对插好羽毛片的羽毛球动态稳定进行检测和处理,对动态不稳定的羽毛球进行相关动态稳定调节。

### 3 羽毛球动态不稳定平衡方法

关于羽毛球动态稳定的判断标准,目前行业里还没有明文规定和参考指标。某工厂检测羽毛球动态稳定的方法主要有:1)通过其外观形状判断;2)利用羽毛球在风洞旋转摆动来判断;3)通过羽毛球试打飞行来判断。风洞实验判断羽毛球动态稳定主要看插好羽毛片的羽毛球在风洞中旋转以及其摆动情况,若羽毛球是动态稳定的,则其在风洞中旋转稳定且无摆动现象;若羽毛球是动态不稳定的,则其在风洞中摇摆不稳定。由羽毛片经过冲洗完成后其质量大小不能够随意增加或者减少,而且球托在插好羽毛片的羽毛球中其质量大小是定值,一般不能够改变。因此羽毛球动态稳定的调节不像一般旋转转子平衡调节那样,通过在某个部位增加或者减少质量,就可以使得羽毛球达到动态稳定。要调节羽毛球动态稳定,必须根据羽毛球的特点,通过调节 16 片羽毛片质心到其旋转轴的距离等方法,使其达到动态稳定要求。本文暂时不考虑风洞实验中空气压差阻力对其动态稳定的影响,也忽略风洞实验中空气阻力对其动态稳定的干扰。根据上述分析,采用羽毛片质点影响系数法对其动态稳定进行平衡调节。

首先定义羽毛球中羽毛片质点影响系数为:

$$\alpha_{ij} = \frac{A_{ij} - A_{j0}}{W_j}; \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, 16 \quad (7)$$

其中:  $n$  表示对羽毛片调节次数;  $j$  为羽毛片数;  $W_j$  为第  $j$  片羽毛片质点位置到球托截面的调节高度;  $A_{ij}$ 、 $A_{j0}$  各为  $W_j$  调节前、后的羽毛球倾斜摆动角;  $\alpha_{ij}$ 、 $A_{ij}$ 、 $A_{j0}$  和  $W_j$  可用复数形式表示。

由于羽毛球可以看成是一个质量连续分布的系统,其摆动与羽毛片质心点产生的不平衡量是线性关系的,设在第  $j$  片羽毛片质心点调节  $W_j$  后,定义此时羽毛球动态稳定残余倾斜摆动为:

$$\varepsilon_i = A_{i0} + \sum_{j=1}^{16} \alpha_{ij} W_j$$

为了便于讨论,对上述式子用矩阵形式表达:

$$\varepsilon = A_0 + \alpha W$$



其中矩阵 $\varepsilon$ 、 $A_0$ 、 $\alpha$ 、 $W$ 表示如下:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} A_{10} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & A_{20} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & A_{n0} \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{116} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{216} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n1} & \cdots & \alpha_{n16} \end{bmatrix}$$

$$W = [W_1 \quad W_2 \quad \cdots \quad W_{16}]^T$$

则其残余倾斜摆动的平方和为:

$$S = \varepsilon^H \varepsilon = (A_0 + \alpha W)^H (A_0 + \alpha W)$$

其中 $H$ 为Hermit矩阵。为了便于讨论,把 $W_j$ 用复数指数形式表示: $W_j = |W_j| e^{iq_j}$ 。其中: $q_j$ 为第 $j$ 片羽毛球片质点位置的调节高度对应的复角,  $|W_j|$ 为 $W_j$ 的模。将其代入有:

$$s = \sum_{i=1}^n \left( \bar{A}_{i0} + \sum_{j=1}^{16} \alpha_{ij} |W_j| e^{-iq_j} \right) \left( \bar{A}_{i0} + \sum_{j=1}^{16} \alpha_{ij} |W_j| e^{iq_j} \right) \quad (8)$$

其中 $\bar{A}_{i0}$ 为 $A_{i0}$ 共轭复数。

若要羽毛球动态稳定达到最好,只要羽毛球残余倾斜摆动的平方和 $s$ 最小即可。在此以羽毛球残余倾斜摆动平方和 $s$ 最小为目标,求解相应羽毛球片质点位置的调节高度。据此,对上述式(8)两边关于 $q_j$ 两边求导,并令其导数为零,则得到:

$$q_j = -\pi + \arg\left(\sum_{i=1}^n \bar{A}_{i0} \alpha_{ij}\right) \text{ 或 } q_j = \pi - \arg\left(\sum_{i=1}^n \bar{A}_{i0} \alpha_{ij}\right) \quad (9)$$

把式(9)代入式(8),并令 $\frac{\partial s}{\partial W_j} = 0$ ,则有:

$$\sum_{i=1}^n \left[ \operatorname{Re}(\bar{A}_{i0} \alpha_{ij} e^{-iq_j}) + \operatorname{Re}(\alpha_{ij} e^{iq_j} \sum_{j=1}^{16} \alpha_{ij} |W_j| e^{iq_j}) \right] = 0 \quad (10)$$

由此得到,在风洞实验中,若羽毛球是动态不稳定的,只要知道羽毛球中羽毛球片质点位置到球托截面的初始高度以及羽毛球片初始倾斜摆动角度和改变高度后的倾斜摆动角度,代入式(7)求出相应的羽毛球片质点影响系数,然后求解式(9)和式(10),便得到相应羽毛球片调节高度值,并根据所得结果对羽毛球进行平衡调节,从而保证羽毛球是动态稳定的。

本文方法的具体步骤如下:

1) 利用风洞等设备测量出羽毛球倾斜摆动角度初值 $A_0$ 。

2) 保持风洞的风速不变,任选定羽毛球中一片羽毛球片,并做下标记,通过提升或者下降羽毛球片质心位置到球托截面的高度,记下此时羽毛球片的位置和高度,测出此时羽毛球在风洞中的倾斜摆动角度 $A_1$ ,然后将其还原初始位置,顺时针选择第二片羽毛球片,按前面方法以此类推,在此过程当中每片羽毛球片提升或者下降的长度和改变的方式都保持一致,测出其对应羽毛球在风洞中的倾斜摆动角度 $A_i (i = 2, 3, \cdots, 16)$ 。

3) 根据式(7)求出16片羽毛球片的质点影响系数,并代入式(9),然后求解式(10),若有解,则可以根据求出的解,对16片羽毛球片进行调节,从而使羽毛球达到动态稳定要求;若无解,接着第4)步。

4) 任意对调两片羽毛球片,测出此时羽毛球的初始倾斜摆动角度 $A'_0$ ,并按照步骤2)和3)的做法,若式(10)有解,则停止调节,若无解,接着对调任意三片、四片等,并按照步骤2)和3)的做法继续寻找,则必定找到满足残余倾斜摆动的平方和 $s$ 最小值的解,使得羽毛球达到动态稳定。

## 4 实验结果

实验中采用某工厂提供的羽毛球风洞装置,其风洞测速机规格为YMQ风洞测速机,任取一个插好羽毛球片的羽毛球,测得其在风洞中旋转时倾斜摆动角度为 $6^\circ$ 。在保持风速不变的情况下,任选羽毛球中一根羽毛球片为开始,顺时针对16根羽毛球片做标记,把选择的羽毛球片的质点位置下降0.01 cm,其他不变,以此类推,测得每片羽毛球片质点位置的初始高度和对应羽毛球片的质点位置下降0.01 cm时的羽毛球倾斜摆动角度如表1所示。

表1 每片羽毛球片下降高度对羽毛球倾斜角度的影响

羽毛球片序号	下降0.01 cm后羽毛球片质心点高度/cm	羽毛球倾斜摆动角度/( $^\circ$ )	羽毛球片序号	下降0.01 cm后羽毛球片质心点高度/cm	羽毛球倾斜摆动角度/( $^\circ$ )
1	3.77	3	9	3.76	4
2	3.76	5	10	3.78	3
3	3.76	5	11	3.75	3
4	3.78	3	12	3.77	2
5	3.75	2	13	3.78	3
6	3.77	2	14	3.77	2
7	3.78	4	15	3.76	4
8	3.77	3	16	3.77	2

根据式(7),求解每片羽毛球片的质点影响系数如表2所示。

表2 每片羽毛球片对应的质点影响系数

羽毛球片序号	羽毛球片质点影响系数/( $(^\circ) \cdot \text{cm}^{-1}$ )	羽毛球片序号	羽毛球片质点影响系数/( $(^\circ) \cdot \text{cm}^{-1}$ )
1	-300	9	-200
2	-100	10	-300
3	-100	11	-300
4	-300	12	-400
5	-400	13	-300
6	-400	14	-400
7	-200	15	-200
8	-300	16	-400

把所得每片羽毛球片的质点影响系数代入式(9)和式(10)求解。经过计算,式(10)有解,从而得到对应羽毛球片质点位置的调节高度如表3所示。

经过上面调节后,在风洞实验中测得此时调节好的羽毛球倾斜摆动角度约为 $0.5^\circ$ ,符合动态稳定性要求。按照上述方法,测试多个羽毛球,效果良好,且耗时少。

表3 每片羽毛球片对应质心点调节高度

羽毛球片 序号	羽毛球片质心点 调节高度/cm	羽毛球片 序号	羽毛球片质心点 调节高度/cm
1	+0.002	9	-0.015
2	-0.011	10	-0.002
3	-0.015	11	-0.005
4	-0.009	12	+0.001
5	+0.005	13	-0.001
6	+0.002	14	+0.001
7	-0.008	15	-0.012
8	-0.003	16	+0.001

注：“+”表示对应羽毛球片在原来位置上提升的距离；  
“-”表示对应羽毛球片在原来位置上下降的距离。

## 5 结语

本文通过对羽毛球质量模型分析,提出了与羽毛球片质量、弯拱度和攻角有关的羽毛球片质点影响系数调节法以及调节步骤,解决了羽毛球动态稳定平衡调节问题。实验结果表明,羽毛球片质点影响系数法与传统人工经验的调节方法相比,除了耗时少、效率高特点之外,而且还具有良好的羽毛球动态稳定平衡调节效果。由于本文忽略羽毛球风洞装置中气流阻力对其动态稳定的干扰,只考虑羽毛球片质量不平衡的影响,因而在分析和实验结果中会存在一定的误差。

### 参考文献:

- [1] ALAM F, CHOWDHURY H, THEPPADUNGORN C, *et al.* Measurements of aerodynamic properties of badminton shuttlecocks [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(2): 2487-2492.
- [2] KITTA S, HASEGAWA H. Aerodynamic properties of a shuttlecock with spin at high Reynolds number [C]// *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 271-277.
- [3] Le PERSONNIC J, ALAM F, Le GENDRE L, *et al.* Flight trajectory simulation of badminton shuttlecocks [C]// *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 344-349.
- [4] LIN C. The analysis of badminton aerodynamics [J]. *China Sport Science and Technology*, 1980(13): 27-33. (林传潮. 羽毛球空气力学分析[J]. 中国体育科技, 1980(13): 27-33.)
- [5] AI X, WANG R, LI X. The application of roundness error measurement in the detection of badminton appearance [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2011, 12(4): 51-54. (艾星芳, 汪仁煌, 李雪晨. 圆度误差测量在羽毛球外观检测中的应用[J]. 广东工业大学学报, 2011, 12(4): 51-54.)
- [6] NAKAGAWA K, HASEGAWA H, MURAKAMI M, *et al.* Aerodynamic properties and flow behavior for a badminton shuttlecock with spin at high Reynolds numbers [C]// *Engineering of Sport Conference 2012*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 104-109.
- [7] GU J, CHEN Y. The design and application of badminton wind tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1980, 9(3): 227-231. (谷嘉锦, 陈玉清. 羽毛球风洞的设计与应用[J]. 实验力学, 1980, 9(3): 227-231.)
- [8] CHEN B Q, WANG Z Q. A statistical method for analysis of technical data of a badminton match based on 2-D seriate images [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(5): 594-601.
- [9] CHEN L M, PAN Y H, CHEN Y J. A study of shuttlecock's trajectory in badminton [J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2009, 77(8): 657-662.
- [10] CHAN C M, ROSSMANN J S. Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory [J]. *Sports Engineering*, 2012, 15(2): 61-71.
- [11] TENG S L, PARAMESRAN R. Detection of service activity in a badminton game [C]// *TENCON 2011: 2011 IEEE Region 10 Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 312-315.
- [12] YOSHIKAWA F, KOBAYASHI T, WATANABE K, *et al.* Automated service scene detection for badminton game analysis using CHLAC and MRA [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, 38(62): 942-945.
- [13] POST S L, McLACHLAN J, LONAS T, *et al.* Aerodynamic of a badminton shuttlecock [C]// *IMECE 2009: Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York: ASME, 2009: 145-150.
- [14] JIANG Y, XI P. The investigation of dynamic stability of badminton's testing instrument [J]. *Measurement and Control Technology*, 1990(4): 37-38. (江玉龙, 奚普周. 羽毛球动态稳定性测试仪研制[J]. 测控技术, 1990(4): 37-38.)
- [8] XIA H Y, SUN D S, YANG Y H, *et al.* Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7120-7131.
- [9] JIANG L, TIAN B, XIONG X, *et al.* Numerical simulations of low attitude wind shear based on Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1761-1766. (蒋立辉, 田百全, 熊兴隆, 等. 基于多普勒激光雷达低空风切变的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1761-1766.)
- [10] WANG B, SHEN F, SUN D, *et al.* Beam scanning and wind field measurement of direct-detection Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 69-72. (王邦新, 沈法华, 孙东松, 等. 直接探测多普勒激光雷达的光束扫描和风场测量[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 69-72.)
- [11] HU X Z, KONG B, ZHENG F, *et al.* Image recognition based on wavelet invariant moments and wavelet neural networks [C]// *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 275-279.
- [12] ZHAO T Z, LU J J, ZHANG Y F, *et al.* Feature selection based on genetic algorithm for CBIR [C]// *Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing*. Washington, DC: IEEE Computer society, 2008: 495-499.
- [13] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 1994, 5(1): 96-101.
- [14] YUN W, XI Y. The analysis of global convergence and computational efficiency for genetic algorithm [J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(4): 455-460. (恽为民, 席裕庚. 遗传算法的全局收敛性和计算效率分析[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 455-460.)
- [15] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N. New fitness functions in binary particle swarm optimization for feature selection [C]// *Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-8.

(上接第901页)